10H

УДК 681.327.12.001.362

А.М. Недзьведь[1], А.М. Белоцерковский[1], С.В. Абламейко[1], В.В. Рязанов[2]
[1] Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск, Беларусь
{nedzveda,abelotser,abl}@newman.bas-net.by
[2] Вычислительный центр им. А.А. Дородницына Российской академии наук
г. Москва, Россия
rvv@ccas.ru

Вычисление объемных характеристик изображений компьютерной томографии*

В статье предложена иерархическая схема анализа, согласно которой вычисление характеристик одного уровня проводится на основе результатов предыдущего уровня, а также описан алгоритм вычисления объемных характеристик объектов изображений компьютерной томографии на основе связных компонент, позволивший уменьшить вычислительные затраты по сравнению с традиционным «объемным» сканированием.

Введение

Анализ изображений компьютерной томографии (КТ) [1] так или иначе связан с вычислением объемных характеристик, обычно одним из трех способов: на основе векторного представления, методом объемной связанной компоненты и путем аппроксимации характеристик плоскостей, образующих объем. Каждый из способов имеет свои недостатки. Так, векторное представление 3D-объекта всегда имеет погрешность, вызванную особенностями его реконструкции, метод связной компоненты оперирует растром, что закладывает погрешность, связанную с размером вокселя [2]. Аппроксимация характеристик образующих плоскостей компенсирует этот недостаток, предполагает, что между образующими плоскостями объект имеет гладкую поверхность, однако медицинские КТ-изображения могут иметь разные межслойные интервалы [3]. Вычисления характеристик объекта в бинарном объеме реализуются двумя способами: накопления информации во время формирования образа объекта и на основе связанной компоненты [4].

Целью данной работы является разработка метода вычисления объемных характеристик объектов изображений компьютерной томографии в соответствии с предложенной иерархической схемой анализа с использованием связных компонент.

Особенность предложенного алгоритма заключается в организации стека линий так, что анализ возможен для изображений с любой связностью. Кроме того, была использована иерархическая схема анализа, согласно которой вычисление характеристик одного уровня проводится на основе результатов предыдущего уровня.

Вычисление объемных характеристик первого уровня на основе метода связных компонент

В основе алгоритма лежит идея попиксельного анализа путем растрового сканирования линий для элементов объекта. Каждая линия при этом сканируется горизонтально в обоих направлениях от заданного пикселя (рис. 1).

* Работа выполнялась в рамках проектов РФФИ 08-01-90016, БРФФИ Т08Р-117 и МТНЦ В-1486.

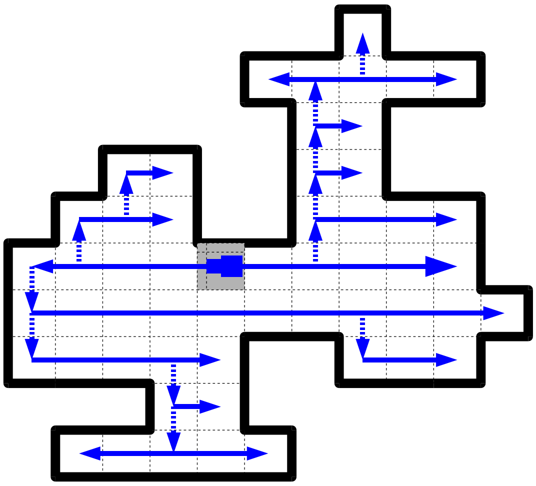
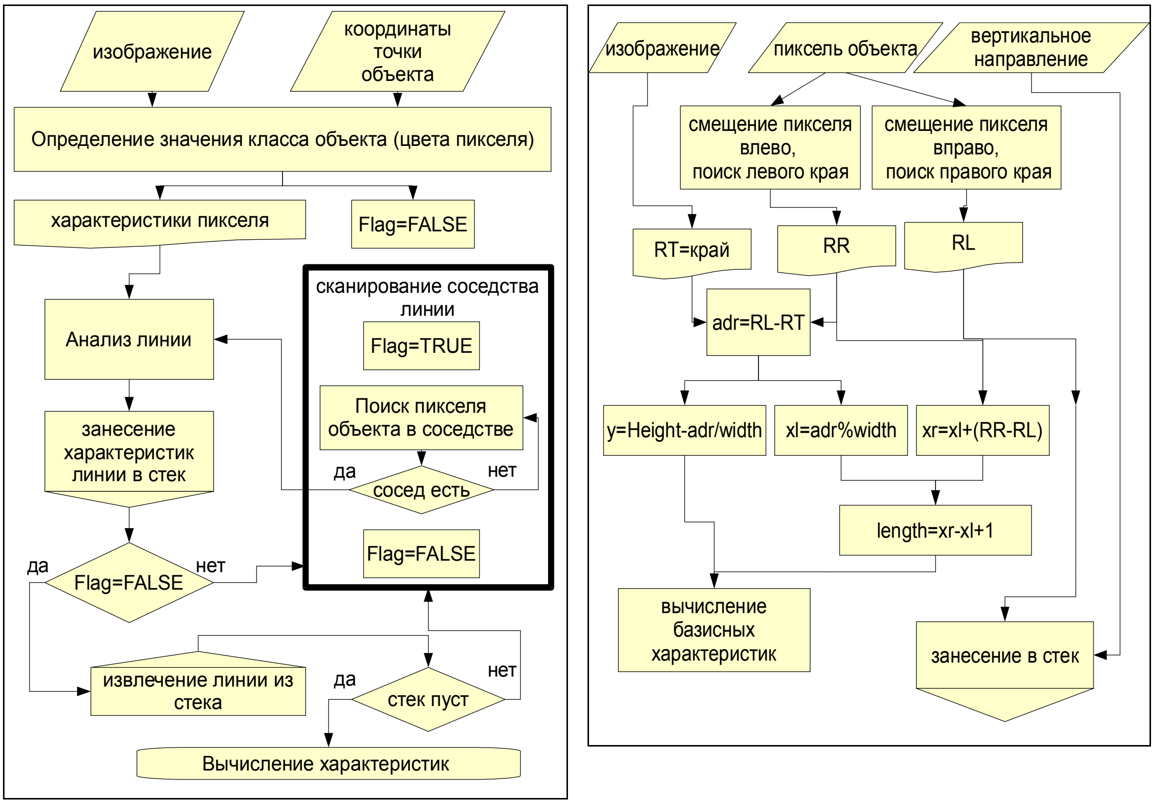


Рисунок 1 – Сложный объект и направления его сканирования (прямые линии – направления сканирования, штриховые – переход после анализа соседства)



а) б)

Рисунок 2 – Схема алгоритма анализа объекта по связанной компоненте (а); схема процедуры анализа линии от заданного пикселя (б)

Алгоритм. Для входного пикселя сканированием определяется горизонтальная линия объекта, и рассчитываются ее координаты, которые заносятся в стек. Одновременно все пиксели линии помечаются флагом или сервисным значением, которое исключает их из дальнейшей обработки, и определяются первоначальные характеристики. Затем они берутся из стека и для текущей линии выполняется поиск соседних пикселей, принадлежащих объекту. Как только такой пиксель обнаруживается, запускается функция анализа и сканирования линии, которой принадлежит найденный пиксель.

Новая линия заносится в стек. Для нее рекурсивно выполняется анализ соседства и анализ связанных линий. Когда рекурсия заканчивается, из стека извлекаются координаты следующей линии и анализ соседних линий повторяется. Алгоритм работает до тех пор, пока в стеке не останется линий. В результате получается растровое сканирование объекта, программно реализуемое через смещение указателей на пиксели.

Выше (рис. 2) дана иллюстрация работы алгоритма анализа объекта по связанной компоненте и развернутая схема процедуры анализа линии от заданного объекта.

На схеме (рис. 2 б) RT – это указатель на крайний пиксель в изображении; RR и RL – указатели на крайние правый и левый пиксели линии, соответственно; *y* – вертикальная координата линии; *xr* и *xl* – горизонтальная и вертикальная координаты правого и левого края линии соответственно, а *length* – длина линии.

Базисные характеристики объектов

На основе занесенных в стек координат положения линий (y, x_l, x_r) рассчитываются первоначальные базисные характеристики: площадь, периметр, геометрические статистические моменты, характеристики яркости и цвета. Эти характеристики определяются кумулятивно при сканировании линий.

Площадь равна сумме всех длин линий на изображении. *Периметр* – числу пикселей на конце линии. Для полноценной линии это 2 пикселя, для одной точки – 1. *Нулевой момент* μ_{00} соответствует сумме пикселей внутри объекта и равен традиционной площади. *Моменты первого порядка* (μ_{10} по горизонтали и μ_{01} по вертикали), нормализированные к площади, соответствуют центру тяжести объекта. Центральными называются моменты большего порядка. Они описывают объекты без учета их положения в пространстве. На практике используют нормализованные к площади центральные моменты, по которым судят о форме объектов. Так, *первый центральный момент* μ_{11} свидетельствует об отличии от круглой формы, *вторые центральные моменты* μ_{20} и μ_{02} – о симметричности объекта относительно горизонтальной и вертикальной осей. Для вычисления геометрических моментов используются характеристики каждой линии объекта:

$$
\begin{gathered}
dc_y = y \cdot length;\, dc_x = length \cdot (x_1 + x_r)/2;\, dm_{02} = dc_y \cdot y;\, dm_{11} = dc_x \cdot y\,; \\
dm_{20} = length \cdot x_1 \cdot x_r + (d_{cx} - length \cdot x_1) \cdot (2 \cdot length - 1)/3; \\
dm_{03} = dm_{02} \cdot y \cdot;\, dm_{30} = dc_x \cdot dc_x;\, dm_{12} = dm_{11} \cdot y;\, dm_{21} = dm_{20} \cdot y.
\end{gathered}
\tag{1}
$$

На их основе посредством накопления вычисляются моменты (табл. 2).

Характеристики яркости определяются как среднее и дисперсия по всем (R, G, B) значениям пикселя.

Таблица 1 – Формулы вычисления некоторых производных характеристик

Моменты первого порядка	Моменты второго порядка	Моменты третьего порядка
$\mu_{10} = \mu_{10} \cdot dc_x$; $\mu_{01} = \mu_{01} \cdot dc_y$.	$\mu_{20} = \mu_{20} \cdot dm_{20}$; $\mu_{11} = \mu_{11} \cdot dm_{11}$; $\mu_{02} = \mu_{02} \cdot dm_{02}$.	$\mu_{30} = \mu_{30} \cdot dm_{30}$; $\mu_{03} = \mu_{03} \cdot dm_{03}$; $\mu_{21} = \mu_{21} \cdot dm_{21}$; $\mu_{12} = \mu_{12} \cdot dm_{12}$.

Производные характеристики объектов

На втором уровне анализа КТ-изображений алгоритм разветвляется для вычисления простых объемных характеристик (объема, поверхности), характеристик, основанных на планиметрических моментах (ориентация, анизотропия, оси и т.п.) и для определения выпуклой формы фигуры [5], [6].

Первая ветвь основана на аппроксимации ряда значений величин (в виде неравномерного ряда). Число величин соответствует количеству слоев изображения и формируется из значений характеристик плоских бинарных объектов для каждого слоя. В случае наличия на одном слое нескольких объектов их значения суммируются. К таким характеристикам относятся: объем (на основе площадей слоев), поверхность (на основе периметров), выпуклый объем (на основе выпуклых площадей слоев), выпуклая поверхность (на основе выпуклых периметров) и т.д.

Характеристики ориентации объекта и оси [2] вычисляются на основе сумм геометрических моментов с учетом ширины между слоями:

$$Angle = \sum_{n} angle_n \cdot d_n , \quad (2)$$

где n – номер слоя, $Angle$ – ориентация объекта, $angle_n$ – ориентация объекта на слое, d_n – толщина слоя.

При определении выпуклой формы объекта затруднение представляют слои с несколькими объектами, которые связаны друг с другом через другие слои. Решение этой проблемы было найдено в объединении всех объектов в один линией, проведенной через центры тяжести объектов. В результате строится выпуклый контур на слое, включающем все объекты. Площадь поверхности, площадь выпуклой поверхности, объем и выпуклый объем находятся интегрированием периметров, выпуклых периметров, площадей и выпуклых площадей соответственно. На основе полученных объемных характеристик на третьем уровне вычисляются значения таких комплексных параметров (табл. 2), как:

– компактность (*compactness*, или *fcircle*) как отношение объема объекта к объему шара с одинаковой площадью поверхности. Шар считается объектом самой компактной формы, для него компактность равна 1;

– сферичность (*sphericity*), свидетельствующая о локальной нерегулярности. Признак сферичности вычисляется как отношение объема объекта к объему описанной сферы, равной по площади поверхности объекта;

– выпуклость (*convexity*) как отношение выпуклой поверхности к обычной. Несмотря на большое количество других известных характеристик, признак выпуклости является достаточно информативным при описании формы объекта. Если объект выпуклый, эта величина будет равна 1, при появлении впадин она уменьшается;

– целостность (*solidity*) – вторичный признак, описывающий структурную плотность и в некотором роде однородность объекта. Он определяется как отношение обычного и выпуклого объема. Если объект целый и не имеет дыр и впадин, эта величина равна 1, при их наличии она уменьшается.

Таблица 2 – Формулы вычисления некоторых производных характеристик

компактность	сферичность	выпуклость	целостность	диметр экв. шара
$\frac{2 \cdot \pi^{3/2} \cdot VOLUME}{3 \cdot surface^{1/2}}$	$\frac{2\pi^{3/2} \cdot VOLUME}{3 \cdot (convexsurface)^{1/2}}$	$\frac{convex\ surface}{surface}$	$\frac{VOLUME}{convex\ volume}$	$\frac{3 \cdot VOLUME}{2 \cdot \pi}$

Дополнительно определяются объемные координаты объекта как минимальные и максимальные значения. Усреднением значений для плоскостей определяются центр масс, средняя яркость и оптическая плотность объекта. Существует еще ряд полезных производных характеристик, например, диаметр эквивалентного объекту шара.

Выводы

Иерархическая схема анализа КТ-изображений дала комплексное решение задачи вычисления более 90 характеристик объектов разной сложности по восьми и четырехсвязности. Модификация, внесенная в алгоритм послойного определения объекта по связанной компоненте через стек, позволила увеличить скорость работы в 1,76 раза по сравнению с простым объемным сканированием.

Литература

1. Календер В. Компьютерная томография. Основы, техника, качество изображений и области клинического использования / Календер В. – М. : Техносфера, 2006. – 343 с.
2. Гонсалес Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М. : Техносфера, 2006. – 1072 с.
3. Хофер М. Компьютерная томография: Базовое руководство / Хофер М. – М. : Медицинская литература, 2006. – 207 с.
4. Абламейко С. В. Обработка оптических изображений клеточных структур в медицине /С.В. Абламейко, А.М. Недзьведь. – Минск, 2005. – 155 с.
5. Kovalev V. Exploring the limits of CT image intensity for discriminating lung tumours and the atelectasis / V. Kovalev, M. Petrou, S. Khoruzhik, R. Zwiggelaar, F. Labrosse (eds) // Medical Image Understanding and Analysis (MIUA 2007), (17-18 July, Aberystwyth, United Kingdom). – BMVA, 2007. – P. 21-25.
6. Фоменко А.Т. Наглядная геометрия и топология / Фоменко А.Т. – М. : Изд-во МГУ, 1993.

А.М. Недзьведь, А.М. Бєлоцерковський, С.В. Абламейко, В.В. Рязанов

Обчислення об'ємних характеристик зображень комп'ютерної томографії

У статті запропонована ієрархічна схема аналізу, згідно з якою обчислення характеристик одного рівня проводиться на основі результатів попереднього рівня, а також описаний алгоритм обчислення об'ємних характеристик об'єктів зображень комп'ютерної томографії на основі зв'язних компонент, який дозволив зменшити обчислювальні витрати порівняно з традиційним «об'ємним» скануванням.

A.M. Nedzved, A.M. Belotserkovsky, S.V. Ablameyko, V.V. Riazanov

Calculation of 3D Characteristics of Objects From Computer Tomography Images

A hierarchical scheme of analysis, which calculates characteristics of one level is carried out on the basis of the previous level, an algorithm for computing the 3D characteristics of CT images based on connected component is also described here. It brings reduced computational cost compared to the traditional «volumetric» scanning

Статья поступила в редакцию 19.08.2009.